

2017

X Reunión Española de Optoelectrónica



Santiago de Compostela

12-14 Julio de 2017

EDITADO POR:

Justo Arines Piferrer

Manuel Blanco Fraga

María Teresa Flores Arias

María del Carmen Bao-Varela

María de la Inmaculada Aymerich López

Publicado por:

Asociación Científica de Óptica y Fotónica de Santiago

ISBN: 978-84-16989-81-2

ISBN 978-84-16989-81-2



Discriminación entre strain y temperatura en un sistema BOTDA mediante redes neuronales artificiales

Strain and temperature discrimination in a BOTDA system via Artificial Neural Networks

Rubén RUIZ-LOMBERA ⁽¹⁾, Arianna PICCOLO ⁽²⁾, Alberto FUENTES-CAYÓN ⁽¹⁾,
José-Miguel LÓPEZ-HIGUERA ^(1,3,4), Jesús MIRAPEIX ^(1,3,4)

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Santander, España.
2. Department Information Engineering, Università di Padova, 35131 Padova (Italy)
3. Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Cantabria, España.
4. Instituto de Investigación Sanitaria Valdecilla (IDIVAL), Cantabria, España

Persona de contacto: Rubén Ruiz-Lombera (ruben.ruiz@unican.es).

RESUMEN:

En este artículo se propone el uso de un enfoque basado en inteligencia artificial, en particular en redes neuronales artificiales, para conseguir una discriminación automática en medidas de *strain* y temperatura en sistemas sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin en fibra óptica, en particular en implementaciones BOTDA.

Palabras clave: BOTDA, dispersión estimulada de Brillouin, sensores distribuidos, sensores de fibra óptica, redes neuronales artificiales, discriminación *strain*/temperatura

ABSTRACT:

We present in this paper the employment of artificial intelligence, in particular artificial neural networks, as a possible solution to achieve automatic discrimination between strain and temperature measurements in distributed sensor systems based on the stimulated Brillouin scattering in optical fibers, in particular in BOTDA implementations.

Key words: BOTDA, stimulated Brillouin scattering, distributed sensors, optical fiber sensors, artificial neural network, temperature and strain discrimination

1.- Introducción

En los últimos años los sensores distribuidos de fibra óptica han sido objeto de un gran esfuerzo investigador, mejorando así sus prestaciones de manera considerable. En particular en los sistemas basados en la dispersión estimulada de Brillouin no sólo se ha mejorado la distancia de medida [1] o la resolución espacial [2], sino que se han hecho esfuerzos por superar limitaciones como los efectos no-locales [3], proponer esquemas de interrogación simplificados [4] o desarrollar sistemas capaces de realizar medidas dinámicas [5]. Buena muestra del auge investigador en este campo es la propuesta de

una normalización en la expresión de las prestaciones de estos sistemas a través de una figura de mérito [6].

Pese a todas estas contribuciones, existe aún mucho margen de mejora. Uno de los aspectos clave a tratar es la posibilidad de discriminar, de manera sencilla, entre las medidas de *strain* y temperatura en estos sistemas. En el caso de implementaciones BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analyzer, analizador óptico de Brillouin en el dominio del tiempo*), las medidas de *strain* y temperatura se reflejan en una dependencia lineal de la frecuencia asociada al máximo de la curva del espectro de ganancia de Brillouin, la denominada BFS

(*Brillouin Frequency Shift*, desplazamiento de la frecuencia de Brillouin).

Algunos autores han propuesto diferentes soluciones para conseguir una correcta discriminación en la medida de ambos parámetros en sistemas BOTDA: mediante el uso simultáneo de sistemas distribuidos Raman o el despliegue de fibras especiales (LEAF o PCF) [7, 8], por ejemplo.

En este artículo se analizará la viabilidad de usar un sistema BOTDA convencional, empleando fibra estándar monomodo como sensor distribuido, junto con una red neural artificial para conseguir la discriminación automática entre el *strain* y la temperatura. Este planteamiento surge de las conocidas variaciones que sufre el espectro de ganancia de Brillouin frente a variaciones de *strain* o temperatura y que se reflejan en diferencias en el ancho y en la ganancia asociada al espectro de Brillouin [9]. De este modo, se evitan los costes adicionales derivados de las otras soluciones propuestas hasta el momento.

2.- Setup experimental

Debido a la dificultad de aplicar *strain* a una sección significativa de la fibra situada en el interior de una cámara climática (dadas sus reducidas dimensiones), se decidió diseñar un tanque de aluminio en el que poder llevar a cabo las medidas de *strain*/temperatura necesarias de manera simultánea. Por un lado, mediante el uso de una resistencia, un sistema de control de la temperatura, una bomba y material aislante, se hacía posible la variación de la temperatura del agua introducida en el tanque. Dentro de éste también se introdujo un montaje para permitir la modificación del *strain* sobre varios metros de fibra, compuesto básicamente por dos ruedas sobre las que enrollar la sección de fibra y un posicionador con el que controlar la tensión aplicada. En la Fig. 1 se presenta una imagen del tanque implementado.

El *setup* BOTDA empleado para realizar las medidas está descrito en detalle en [10]. Está formado por una fuente láser emitiendo a 1550.92nm. Los pulsos de bombeo se generan mediante un amplificador óptico semiconductor, seguido de un EDFA (*Erbium-doped fiber amplifier*) y un

aleatorizador de polarización. La señal continua de prueba se forma mediante un generador de RF y un modulador electro-óptico. La parte de detección está compuesta por un filtro FBG, un detector de 125MHz y alta transimpedancia y una tarjeta adquisidora. El ancho de los pulsos de bombeo se fijó en 12ns, y se utilizó un promediado de 1024 sobre las trazas adquiridas.

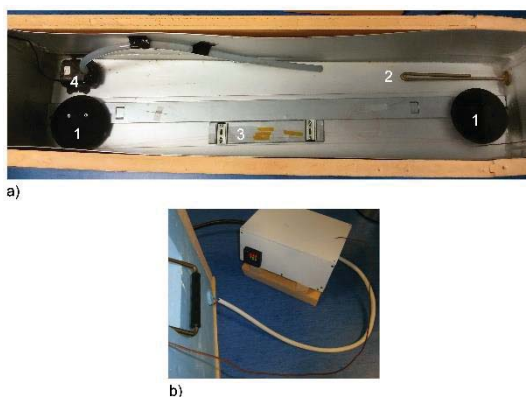


Fig. 1: Tanque de agua diseñado para las medidas simultáneas de *strain* y temperatura: a) detalle del tanque con las ruedas para posicionar la fibra (1), resistencia (2), placa para sujetar la fibra (3) y bomba de agua (4); b) detalle del controlador de temperatura.

3. Diseño de la red neuronal

En el presente trabajo se ha considerado un diseño básico de red neuronal artificial (RNA). La red se basa en la arquitectura *feedforward* y emplea un algoritmo de aprendizaje supervisado del tipo *backpropagation*. Como algoritmo de entrenamiento se seleccionó una optimización Levenberg-Marquardt, usando el método de mínimos cuadrados para decidir si la fase de entrenamiento debe finalizar. Los datos de las trazas BOTDA adquiridas se dividieron en diferentes sets para el entrenamiento, validación y test de la red. Tanto el porcentaje de datos asignados a cada etapa, como la propia estructura de la red y el tratamiento de los datos BOTDA de entrada se variaron para estudiar su influencia en la tasa de clasificación final. El muestreo de las trazas BOTDA realizado para alimentar las neuronas de entrada fue realizado de dos maneras distintas: a) seleccionando las parejas de

frecuencia/intensidad en puntos específicos del espectro de ganancia de Brillouin según su intensidad con respecto al máximo (25, 40, 50, 70, 85 and 95%, método “alturas”); b) realizando un ajuste Lorentziano a la curva de ganancia y empleando los parámetros resultantes como valores de entrada a la red.

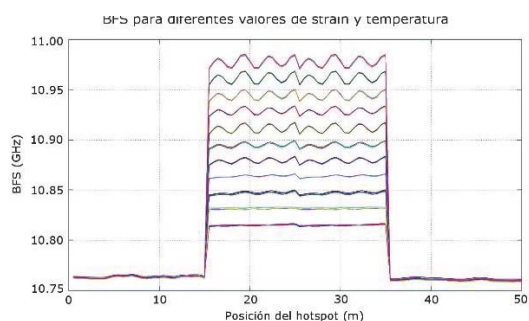


Fig. 2: Ejemplo de medidas de strain y temperatura obtenidas para $T=70^{\circ}\text{C}$ y diferentes strains.

La Fig. 2 muestra un ejemplo de los datos capturados para validar el enfoque propuesto. En este caso se trata de la BFS resultante al aplicar diferentes niveles de *strain* a una sección de la fibra de medida (*hotspot*, situada a mitad de un canal de 2Km) para una temperatura constante de 70°C .

Como puede apreciarse, la BFS aumenta con un incremento del *strain* aplicado, estando cada curva asociada a una elongación de aproximadamente 0.5mm en la sección *hotspot* de 20m. Se puede apreciar también que, a medida que aumenta el *strain*, éste deja de ser homogéneo en toda la sección, debido a que la fibra que está en contacto con las ruedas del *setup* descrito en la Fig. 1 sufren una tensión superior.

4.- Resultados

Diferentes medidas, considerando un rango de temperaturas de 20 a 72°C en pasos de 8°C y un rango de elongaciones de 0 a 5mm (sobre la sección *hotspot* de 20m) fueron realizadas para llevar a cabo las fases de entrenamiento, validación y test de la RNA diseñada. Diferentes parámetros, incluyendo la propia estructura de la red (número de capas ocultas, de neuronas) y el método de selección de los datos de entrada a la red, se variaron para

analizar el rendimiento en clasificación de la red.

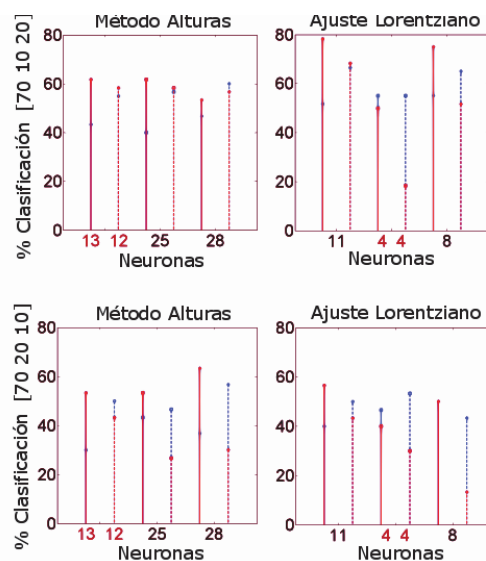


Fig. 3: Ejemplo de resultados obtenidos para diferentes configuraciones de la red, donde $[x$ y $z]$ indica los porcentajes de datos empleados en entrenamiento, validación y test respectivamente. Los valores de clasificación de strain y temperatura se han representado en rojo y azul, respectivamente. En el eje x , el color rojo indica el uso de dos capas ocultas, mientras que el negro indica el uso de una única capa oculta con el número de neuronas indicado.

En la Fig. 3 se presenta una muestra de los resultados obtenidos. Puede apreciarse como los mejores porcentajes de clasificación en strain y temperatura se dan en este caso para un set de datos distribuido con un 70% para entrenamiento, un 10% para validación y un 20% para test; empleando ajuste Lorentziano como método para muestrear los datos de entrada y con una única capa oculta con 11 u 8 neuronas.

Además, también se evaluaron diferentes métodos de evaluación de los datos de salida de la RNA: promediando los resultados para todos los puntos del *hotspot* (especialmente) y obteniendo un único valor representativo (línea continua) o seleccionando directamente el máximo valor del vector de salida de la RNA para strain y temperatura (línea discontinua).

5.- Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una propuesta basada en el uso de RNAs en sistemas

sensores distribuidos basados en la dispersión estimulada de Brillouin, más concretamente en implementaciones BOTDA, para conseguir una discriminación automática en las medidas de *strain* y temperatura. El estudio puede entenderse como un análisis de viabilidad que consideramos satisfactorio, ya que aunque los resultados de clasificación obtenidos son claramente mejorables, existen diferentes líneas futuras que podrían permitir obtener aún mejores resultados.

Por un lado, en las medidas BOTDA se ha considerado un ancho de pulso de bombeo fijo de 12ns, pero el hecho de emplear un valor cercano al tiempo de vida del fonón acústico puede implicar un ensanchamiento en el espectro de Brillouin resultante, ocultando así los cambios en los espectros de ganancia que se pretenden detectar por medio de la RNA. Por otro lado, el *setup* experimental empleado para realizar las medidas de *strain* no permite obtener un perfil de *strain* constante a lo largo de la sección *hotspot*, pudiendo afectar negativamente a los resultados de clasificación obtenidos. En futuros trabajos se tratarán estos aspectos, así como el uso de otros enfoques de inteligencia artificial.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido cofinanciado por los proyectos TEC2013-47264-C2-1-R and TEC2016-76021-C2-2-R (AEI/FEDER, UE) and CIBERBBN via FEDER funds.

Referencias

- [1] M.A. SOTO, X. ANGULO-VINUESA, S. MARTIN-LOPEZ, S.-H. CHIN, J.D. ANIA-CASTANON, P. CORREDERA, et al., "Extending the real remoteness of long-range Brillouin optical time-domain fiber analyzers", *Journal of Lightwave Technology*, 32, 152-62, 2014.
- [2] K.Y. SONG, Z. HE, K. HOTATE, "Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis", *Optics letters*, 31, 2526-8, 2006.
- [3] R. RUIZ-LOMBERA, J. URRICELQUI, M. SAGUES, J. MIRAPEIX, J.M. LOPEZ-HIGUERA, A. LOAYSSA, "Overcoming Nonlocal Effects and Brillouin Threshold Limitations in Brillouin Optical Time-Domain Sensors", *Photonics Journal, IEEE*, 7, 1-9, 2015.
- [4] H. IRIBAS, J. URRICELQUI, J. MARINELARENA, M. SAGUES, A. LOAYSSA, "Cost-effective Brillouin optical time-domain analysis sensor using a single optical source and passive optical filtering", *Journal of Sensors*, 2016.
- [5] J. URRICELQUI, A. ZORNOZA, M. SAGUES, A. LOAYSSA, "Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation", *Optics express*, 20, 26942-9, 2012.
- [6] M.A. SOTO, L. THÉVENAZ, "Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors", *Optics express*, 21, 31347-66, 2013.
- [7] C. LEE, P. CHIANG, S. CHI, "Utilization of a dispersion-shifted fiber for simultaneous measurement of distributed strain and temperature through Brillouin frequency shift", *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(2001) 1094-6.
- [8] L. ZOU, X. BAO, S. AFSHAR, L. CHEN, "Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber", *Optics letters*, 29, 1485-7, 2004.
- [9] M. NIKLES, L. THEVENAZ, P. ROBERT, "Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers", *Lightwave Technology, Journal of*, 15, 1842-51, (1997).
- [10] R. RUIZ-LOMBERA, J. MIRAPEIX, I. LAAROSI, L. RODRÍGUEZ-COBO, J. LOPEZ-HIGUERA, "Brillouin frequency shift estimation in BOTDA via subpixel processing", *Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS'2016), International Society for Optics and Photonics 2016*, pp. 99162L-L-4, 2016.